

УДК 622.673.1 : 681.514.54

## ДОСЛІДЖЕННЯ АДАПТАЦІЇ ІНЕРЦІЙНОГО ДАВАЧА МП-95 ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЛІНІЙНИХ ПРИСКОРЕНЬ

<sup>1</sup>Б.В.Копей, <sup>2</sup>В.В.Лопатін, <sup>3</sup>О.І.Стефанишин<sup>1</sup>ІФНТУНГ, 76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42166  
e-mail: [koreyb@nimg.edu.ua](mailto:koreyb@nimg.edu.ua)<sup>2</sup>ІГТМ НАН України, м. Дніпропетровськ, вул. Сімферопольська, 2-а<sup>3</sup>ЦБВО ВАТ „Укрнафта”, 79760, Львівська обл., м. Борислав, вул. Шевченка, 77-а

Предлагается адаптировать датчики для оценки вибраций в редукторах станков-качалок для их диагностирования и повышения качества ремонта. Разработанный метод тарирования аппаратуры отличается от существующих тем, что применение динамической тарировочной функции обеспечивает точность до 7-9% каждого экземпляра МП-95 в рабочем диапазоне частот колебаний редуктора станка-качалки. Только так датчики будут отвечать предъявляемым требованиям и их можно будет рассматривать как единую систему в мобильных измерительных комплексах.

Перехід економіки України на ринкові відносини вимагає застосування вимірювальної і діагностичної апаратури в нафтовій та гірничовидобувній промисловості з максимальним ефектом, у зв'язку з чим першочергове значення має дослідження раціонального використання первинних давачів [1,2]. Нами запропоновано використовувати давачі для оцінки вібрацій у редукторах верстатів-гойдалок з метою їх діагностування та підвищення якості ремонту [3-5]. У роботі [1] виведене диференціальне рівняння інерційного давача потенціометра (формула 15), справедливого для будь-яких співвідношень між параметрами давача і для будь-яких режимів його роботи: дорезонансних, резонансних чи зарезонансних. З технічної документації на інерційний давач МП-95 (6Л2.775.001ТО) не відомі ні жорсткість пружини, ні гідравлічний опір демпфуючої рідини руху чутливого елемента. Отже, наперед не може бути відомо якому значенню абсолютної віброшвидкості і вібропереміщення відповідає виміряне значення вихідного сигналу.

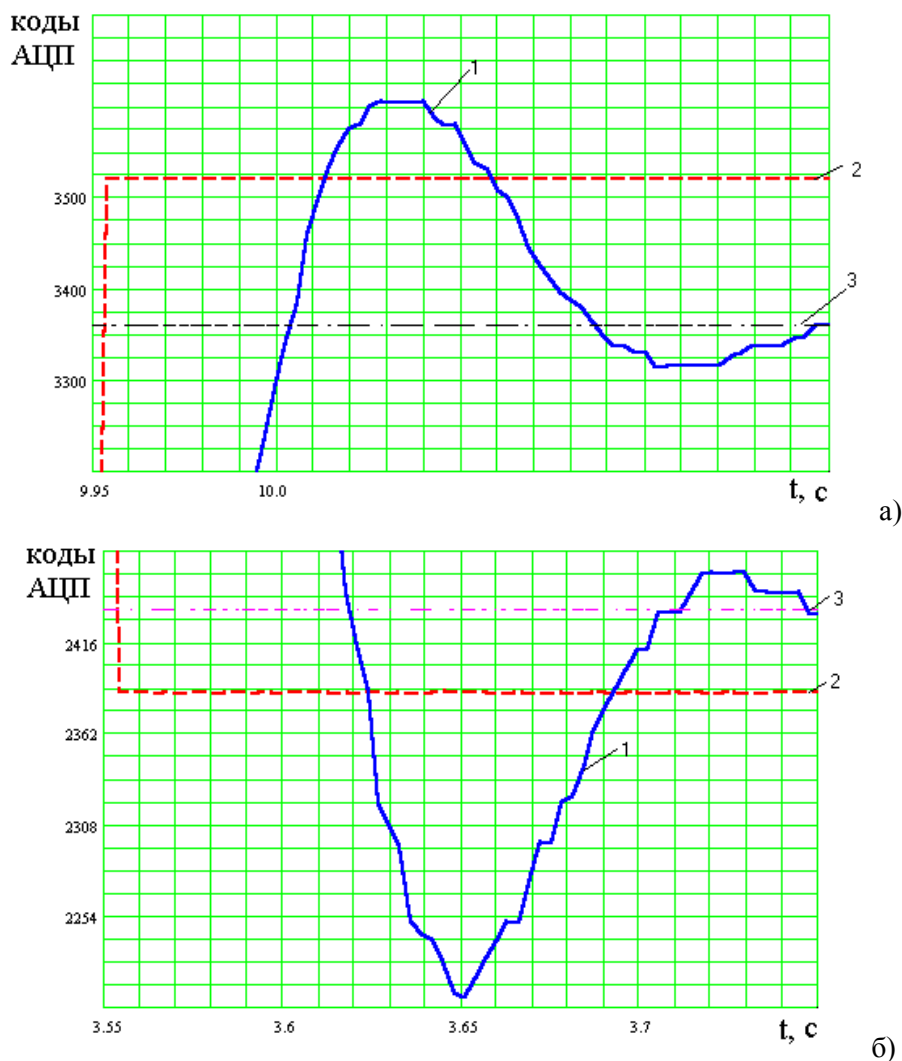
Метою дослідження є встановлення впливу на амплітуду і фазу вихідного сигналу давача віброшвидкості і вібропереміщення чутливого елемента давача усередині його корпусу. Віброшвидкість і вібропереміщення чутливого елемента залежать від частоти і амплітуди абсолютних позовжних вібрацій корпусу давача. Отже, щоб імітувати різні значення вібропереміщень і віброшвидкості чутливого елемента, достатньо створити абсолютні позовжні вібрації корпусу за певним законом. З нього розрахунковим шляхом впливає, що корпус повинен рухатися із заданими віброшвидкістю та амплітудою вібропереміщень.

It is suggested to adapt transducer for estimation of vibrations in the reducing gears of pumping units with the purpose of their diagnostics and upgrading repair. The developed method of tare of apparatus differs from existing to those that with application of dynamic tare function provides exactness of to 7-9% every copy MP-95 in the working range of frequencies of vibrations of reducer. Only so transducer will respond to request, which are produced, and they can be examined as unique system in mobile measuring complexes.

Для визначення режиму демпфування давача було поставлено експеримент із дії на давач стрибкоподібного прискорення, що прикладається (і знімається), яке викликало стрибкоподібний додаток сили до чутливого елемента, що викликав його зсув усередині корпусу. Оскільки чутливий елемент є магніточутливим, то така сила прикладена зовнішнім магнітним полем, яке потім миттєво знімається. Як впливає з фізики процесу, це може викликати вільні затухаючі коливання повзуна резистора МП-95.

Визначаючи за осцилограмою частоту і декремент згасання вихідного сигналу для кожного давача, на підставі запропонованої в роботі [1] математичної моделі розраховуємо його постійні параметри, що входять у формулу (15) (С/М, К/М, К<sub>гр</sub>), яку вважаємо формулою динамічного тарування давача.

Як відомо, для частот вимушених коливань давача, в яких один з трьох доданків домінує за амплітудою, що пропорційна першій похідній від вихідного сигналу, сам вихідний сигнал, реєстрований апаратурно, пропорційний абсолютній швидкості переміщення корпусу. В цьому режимі давач виконує роль велосиметра (якщо він був тарований за першим ступенем вихідного сигналу). На тих частотах, де домінує складова, пропорційна другій похідній від вихідного сигналу, сам вихідний сигнал буде пропорційний абсолютному переміщенню корпусу, а давач працюватиме в режимі вібрографа. Проте, якщо синхронно з реєстрацією (або з деякою затримкою) виконувати апаратурне (або програмне) диференціювання вихідного сигналу, записаного в цифровому вигляді, і підсумовування доданків з урахуванням знайдених експериментально коефіцієнтів, то формула



1 – динамічний сигнал давача; 2 – імпульс збудження;  
3 – сталі значення сигналу після згасання коливань

**Рисунок 1 — Осцилограма переднього (а) і заднього (б) фронту затухаючих коливань повзуна МП-95**

(15) дасть значення абсолютного прискорення корпусу давача.

Для реалізації цього підходу було виготовлено установку з потужним соленоїдом, який створює постійне магнітне поле, що впливає на чутливий елемент давача (повзун внутрішнього резистора). Запис проводився на високошвидкісний цифровий реєстратор з відносною похибкою вимірювань вхідного сигналу не більше 0,025% від шкали вимірювань (шкала вимірювань – 1 Вольт). Виготовлена установка з використанням соленоїда забезпечує відсутність впливу магнітного поля, яке швидко зникає, на вихідний електричний сигнал через обмотку резистора давача.

Даний метод калібрування МП-95 дає можливість оцінити якість системи загалом із урахуванням внеску кожного елемента, включаючи чутливість за напругою, час наростання, викид на фронті "ударного" імпульса, негативний викид в кінці імпульса і всі постійні часу. Кожна з перерахованих величин може накладати

певні обмеження на використання вимірювальної системи в конкретних практичних випадках. Перевага даного методу калібрування полягає у відносній легкості його забезпечення, в участі всіх компонентів системи в процесі та відсутності похибок у заданні еталонної механічної дії на корпус давача.

Осцилограми вимірювань зображені на рис. 1. Дані по осі ОУ вказані в кодах аналого-цифрового перетворювача, пропорційних вихідному сигналу давача.

З осцилограм, зображених на рис. 1, видно, що давач МП-95 має докритичний режим демпфування. Після подачі або зняття напруги на соленоїді повзун створює одне затухаюче коливання і встановлюється в рівноважному положенні, що відповідає величині діючої сили.

Відповідно до математичної моделі, одержані графіки дають змогу визначити відомим у механіці методом резонансної частоти, коефіцієнт дисипації системи, а також запізнення по фазі кожного конкретного давача. Для цього з

використанням математичного пакету Matcad-7 Pro було складено програми з обчислення цих параметрів МП-95 і занесення їх в базу даних бортового комп'ютера.

На підставі формули (9) роботи [1] розв'я \-зок, що описує поведінку повзуна резистора у разі додавання до нього (або миттєвого зняття з нього) постійної магнітної сили, має вигляд:

$$y = \exp\left(-\frac{a}{2}t\right) \times \left[ U_0 \cdot \cos(\lambda \cdot t) + \frac{\dot{U}_0}{\lambda} \sin(\lambda \cdot t) \right] \cdot \frac{1}{K_{ep}}, \quad (1)$$

де:  $U_0$  – вихідний сигнал до початкового моменту включення (зняття) магнітного поля;  $\dot{U}_0$  – початкова швидкість зміни сигналу (для даних експериментів рівна нулю);  $\lambda$  – кругова частота затухаючих коливань повзуна.

За даними, зображеними на осцилограмах, визначається напівперіод затухаючих коливань  $T_2$  і амплітуди перших двох сплесків  $U_1$  і  $U_2$  (одна з амплітуд береться із знаком "мінус"). Із наведеного розв'язку випливає, що коефіцієнт дисипації  $a$ , власну частоту затухаючих коливань повзуна  $\lambda_{dem}$ , частоту власних недемпфованих коливань  $\lambda_{np}$ , коефіцієнт градування  $K_{ep}$ , коефіцієнт пружності  $b$  можна визначити за формулами

$$a = \frac{2}{T_2} \ln\left(-\frac{U_1}{U_2}\right), \quad \lambda_{dem} = \frac{\pi}{T_2}, \quad b = \frac{a^2}{4} + \pi^2 T_2, \\ \lambda_{np} = \frac{\sqrt{b}}{2\pi}, \quad K_{ep} = \lambda_{dem}^2 \frac{4\pi^2}{B_1}. \quad (2)$$

В результаті дослідження отримані такі середні значення:  $a=58,7$ ,  $b=2403$ ,  $\lambda_{dem}=6,2$  Гц,  $\lambda_{np}=7,8$  Гц,  $K_{ep}=61,74$ .

Визначені індивідуальні параметри кожного давача, потрібні для діагностичної мети, заносяться в базу даних бортового комп'ютера апаратури.

Якщо внаслідок зовнішньої періодичної дії на корпус давача його вихідний сигнал змінюється згідно закону:

$$U_{вин} = m \sin(\omega t), \quad (3)$$

де:  $m$  – амплітуда вихідного сигналу, В;  $\omega$  – кругова частота вихідного сигналу, то формула (15) роботи [1] дає можливість визначити внесок кожної складової в набуте значення вимірюваного прискорення корпусу давача. Власна частота вихідного сигналу буде  $\Omega = \omega / 2\pi$ :

при  $U(t) = m \sin \omega t$

$$\dot{U}(t) = m\omega \cdot \cos \omega t; \quad \ddot{U}(t) = -m\omega^2 \cdot \sin \omega t. \quad (4)$$

Підставивши ці значення в рівняння (15) роботи [1], одержимо:

$$\ddot{X} = \frac{m}{K_{ep}} \left[ (\omega^2 - b) \sin \omega t - a\omega \cos \omega t \right]. \quad (5)$$

Або інакше:

$$\ddot{X} = \frac{m}{K_{ep}} \sqrt{(\omega^2 - b)^2 + (a\omega)^2} \sin(\omega t + \varphi), \quad (6)$$

де

$$\varphi = \frac{1}{\pi} \arctg\left(\frac{-a\omega m}{\omega^2 - b}\right). \quad (7)$$

Тоді введемо:

$$\ddot{X}_{max}^{(\Omega)} = \frac{m}{K_{ep}} \sqrt{(\omega^2 - b)^2 + a^2 \omega^2}; \quad (8)$$

$$P_1 = \frac{\ddot{X}_{max}}{X_{stmax}}; \quad (9)$$

$$X_{stmax} = \frac{-Mb}{K_{ep}}; \quad (10)$$

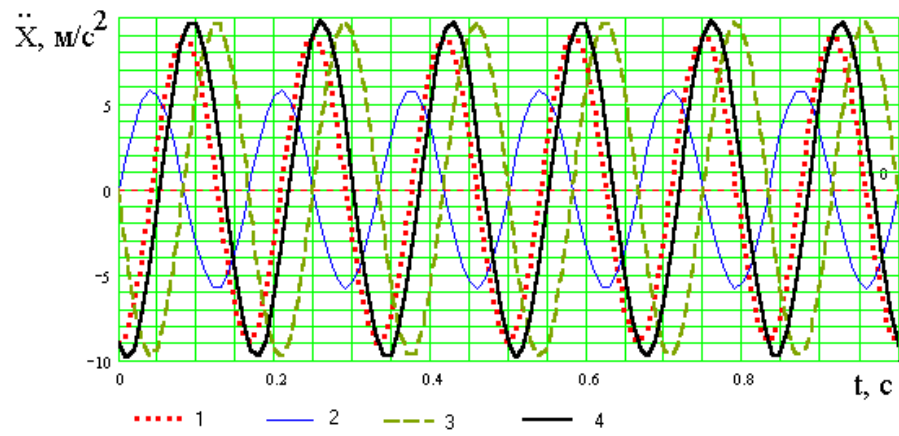
$$\Delta\Omega = \frac{X_{stmax} - \ddot{X}_{max}}{X_{stmax}}. \quad (11)$$

Для класичного режиму роботи МП-95 в режимі акселерометра, при таруванні за першим ступенем вихідного сигналу найкраще, коли  $P_1 \approx 1$ ,  $\varphi \approx 0$  або  $\Delta \approx 0$ . При статичному таруванні до частоти 0...6 Гц МП-95 діапазону  $\pm 1,5g$  МП-95 працює як акселерометр, за частоти 7...10 Гц – як велосиметр, а за частот понад 11 Гц – як віброграф.

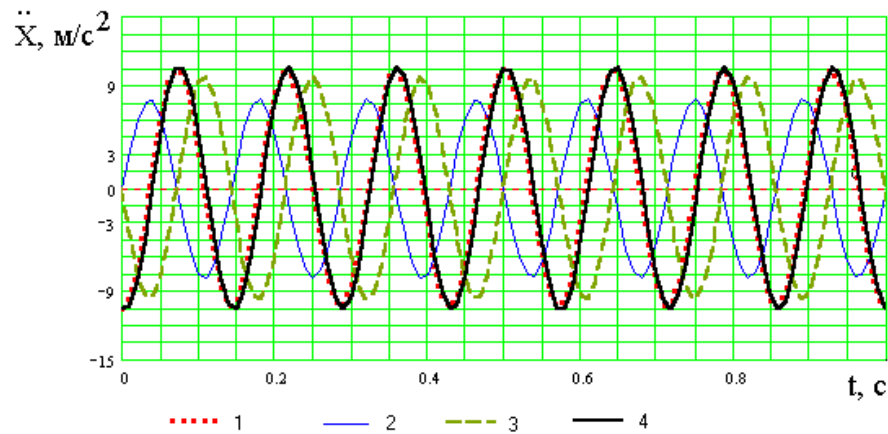
На рис. 2-5 зображені графіки прискорення корпусу, одержані за формулою (15) для різних значень частоти вимушеної дії, де прискорення корпусу давача (4) і його складових, обумовлених пружністю пружини (3), дисипацією рідини (1) і інерційними властивостями повзуна резистора (2).

Тут:  $X_{st}(t)$  – складова, пропорційна першому ступеню вихідного сигналу (у дорезонансній області вона пропорційна прискоренню корпусу),  $\dot{X}(t)$  – складова, пропорційна першій похідній від вихідного сигналу (у колорезонансній області, де вона домінує порівняно з рештою доданків, давач працює в режимі велосиметра);  $\ddot{X}(t)$  – складова, пропорційна другій похідній від вихідного сигналу (у зарезонансній області, де вона домінує порівняно з рештою доданків, давач працює в режимі вібрографа);  $XX(t)$  – виміряне значення прискорення корпусу. З рисунків видно всі вказані режими для МП-95 оскільки графік величини  $XX(t)$  співпадає з графіком одного із вказаних доданків (рис. 2: а) – режим акселерометра; б), в) – режим велосиметра; г) – режим вібрографа, якщо вести тарування давача за першим ступенем вихідного сигналу. Якщо як повну тарувальну функцію застосовувати формулу (15), то за будь-яких частот вихідного сигналу  $XX(t)$  вона дасть величину вимірюваного прискорення корпусу давача.

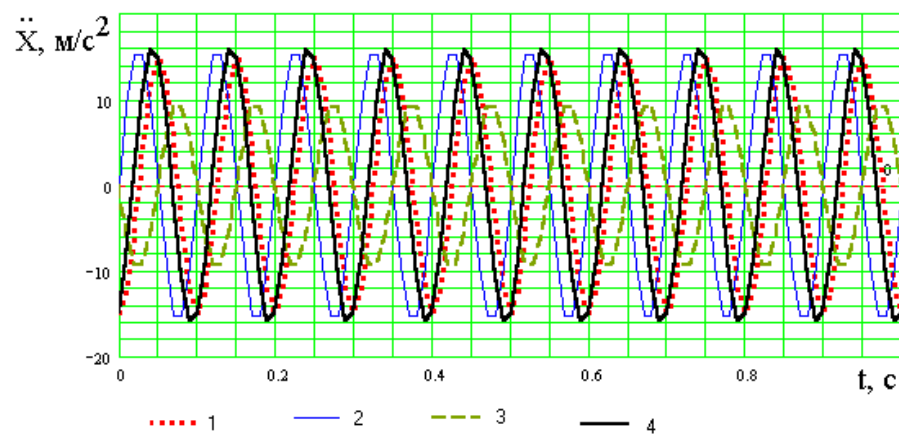
Таким чином, вирішена задача дослідження поведінки МП-95 у діапазоні  $\pm 1,5g$  при заданому законі вихідного сигналу виробу  $U(t) = m \sin(\omega t)$ , де  $m=0,25V$ , за формулами динамічного і статичного тарування. Із динаміч-



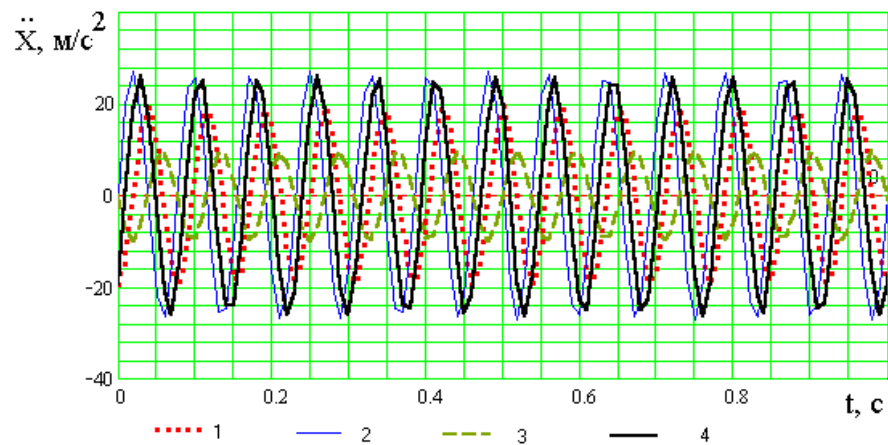
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2 — Графіки за частоти вихідного сигналу давача  
6 Гц (а), 7 Гц (б), 10 Гц (в) і 13 Гц (г) відповідно

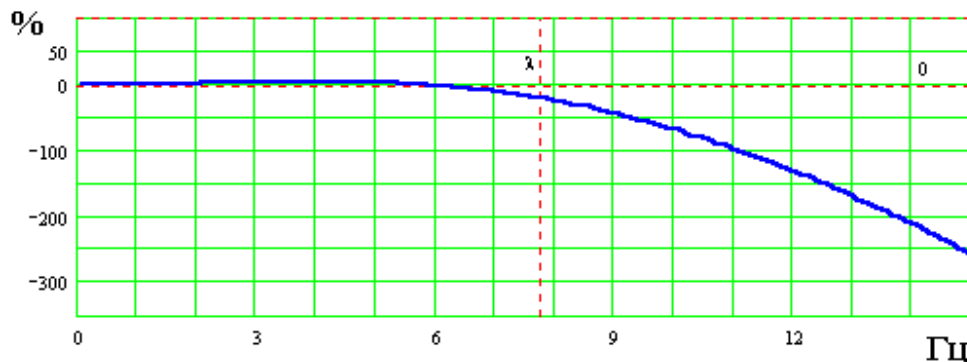


Рисунок 3 — Відносна розбіжність між амплітудами виміряного лінійного прискорення у разі статичного і динамічного тарувань (%)

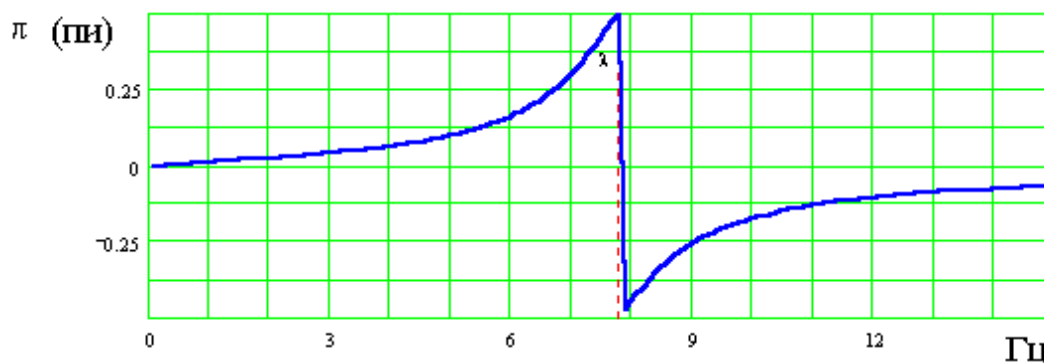


Рисунок 4 — Зсуви по фазі між амплітудами виміряного лінійного прискорення у разі статичного і динамічного тарувань (π)

ного експерименту беремо  $U_1$  і  $U_2$ ,  $1/2 T$ , всі інші параметри обчислюємо за класичними формулами теоретичної механіки. Як тарувальну модель, вибрано модель лінійної системи з одним ступенем свободи.

За формулами (8)-(11) проведено дослідження відмінностей між результатами статичного і динамічного тарувань.

На рис. 3 зображено графік розбіжності між амплітудами виміряного прискорення у разі статичного і динамічного тарувань (%).

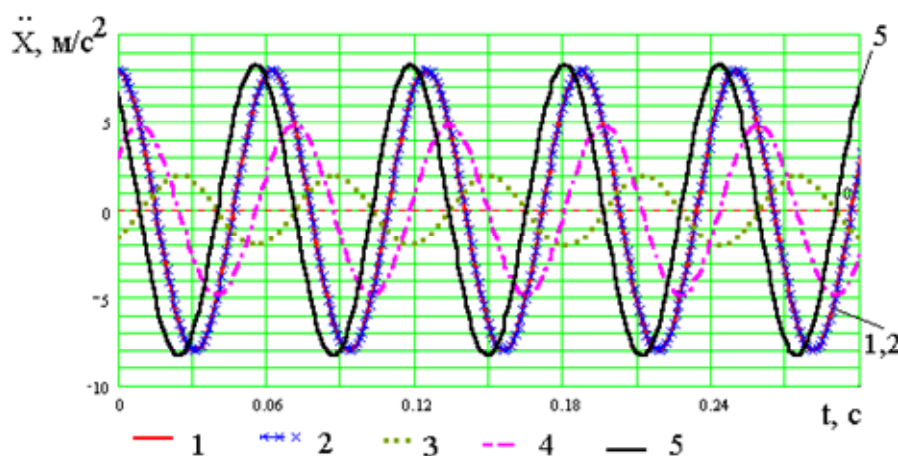
З рис. 3 видно, що в діапазоні частот збудження  $\omega=0-6,5$  Гц давач дає цілком прийнятні, з погляду практики, значення лінійних прискорень за формулою статичного тарування. У діапазоні  $\omega=3,5-4,5$  Гц результати, одержані за статичною формулою, перевищують за амплітудою результати, одержані за динамічною формулою на 10%. Можна вважати, що вони йдуть в запас залишкової міцності вузла з погляду безпеки його роботи. У діапазоні 6,5-9 Гц відмінність в результатах коливається від 0 до 50%. За межами 9 Гц відмінність в результатах сягає вже 250%. Видно, що після частоти 6,5 Гц значення, одержані за динамічною формулою, досягають значних величин. Таким чином, якщо для технології діагностики необхідне отримання досить точних значень лінійних прискорень об'єкта в діапазоні частот 6,5 Гц, то слід користуватися або формулою динамічного тарування (що включає диференціювання вихідного сигналу МП-95 і його попереднє згладжу-

вання), або застосувати наступну за чутливістю модифікацію.

На рис. 4 зображено одержаний за (7) графік зсуву по фазі між амплітудами виміряного лінійного прискорення у разі статичного і динамічного тарувань (π).

З графіка видно, що фаза  $F$  вихідного сигналу МП-95, в порівнянні з фазою вимушених коливань після резонансу  $\omega=7,8$  Гц, змінює знак. Тому, значення сигналу, одержаного за формулою динамічного тарування, в резонансній зоні роботи МП-95, має протилежний знак на відміну від того, який був би одержаний за формулою статичного тарування. З цього випливає, що у разі використання динамічного тарування апаратура вимірювання повинна включати аналізатор спектра вихідного сигналу МП-95, який би визначав, в якій зоні працює конкретний виріб, для визначення фази фактичного переміщення об'єкта. Це необхідно для прив'язки параметрів вібрацій до конкретного елемента верстата-гойдалки. У практиці аналізу проходження періодичних сигналів через лінійні кола звичайно обмежуються використанням амплітудно-частотних характеристик (АЧХ). Під час аналізу спотворень ударних процесів, особливо за піковим значенням, облік ФЧХ є абсолютно необхідним. Реальні АЧХ і ФЧХ давача МП-95 обумовлюють лінійні спотворення сигналу: гармонійні сигнали одержують різні зміни масштабу і фазове зрушення. Тому виникає потреба на кожен МП-95





- 1 – сигнал відновлений за динамічною тарувальною формулою;  
 2 – тестовий синусоїдальний сигнал;  
 3 – сигнал відновлений за статичною тарувальною формулою;  
 4 – складова сигналу пропорційна першій похідній;  
 5 – складова сигналу пропорційна другій похідній

Рисунк 5 — Відновлення сигналу МП-95 із застосуванням диференціальної функції

вимірювального комплексу мати свою АЧХ і ФЧХ у пам'яті бортової ПЕОМ, необхідно щоб це зрушення враховувалося для всіх робочих частот. Комп'ютерна високошвидкісна реєстрація вихідного сигналу МП-95 дає можливість автоматично виконувати одно і дворазове диференціювання за часом вихідного сигналу МП-95, причому похідні від вихідного сигналу розраховуються шляхом чисельного диференціювання даних, одержаних шляхом високошвидкісної цифрової реєстрації з попереднім згладжуванням, що усереднює «шум» АЦП. Необхідний інтервал часу усереднювання визначається параметрами «шуму» конкретного АЦП. Тому припускаємо, на відміну від традиційного методу, використовувати як тарувальну функцію повне диференціальне рівняння коливань повзуна МП-95 рівняння (15) роботи [1], записане щодо його вихідного сигналу з коефіцієнтами дисипації і пружності, визначеними з динамічного експерименту. Тестування різних форм тарувань, на відповідність істинним (розрахунковим) значенням, зображено на рис. 5.

Як видно з графіків, дана формула дає точне, відновлене розрахунковим шляхом значення лінійного прискорення корпусу виробу у всіх трьох зонах частот. У разі переходу в зарезонансну зону частот фаза коливань повзуна усередині корпусу МП-95, по відношенню до фази коливань корпусу, міняє знак. Це треба враховувати для правильного визначення знаку миттєвого лінійного прискорення корпусу МП-95.

Необхідно під час комп'ютерної обробки даних з частотою власних пружних коливань повзуна МП-95. Результати порівняння враховуються у вигляді зміни знаку в остаточному значенні розрахованого миттєвого лінійного прискорення корпусу виробу (числом, одержаним для зарезонансної зони і дорезонансної зони). Таким шляхом досягається розширення

області застосування МП-95 з діапазоном  $\pm 1,5g$  на весь робочий діапазон частот і амплітуд віброприскорень деталей редуктора верстатогойдалки. З характеру АЧХ видно, що в зарезонансній зоні відбувається значне зниження амплітуди вихідного сигналу до 5 разів, відповідного одному і тому ж амплітудному значенню віброприскорення корпусу МП-95 (зона роботи виробу в режимі вібрографа). Якби в цій зоні застосовувалася традиційна формула тарування давача за 1-м ступенем вихідного сигналу, то одержана при цьому похибка вимірювання лінійного прискорення досягала б такого ж значення. Повна диференціальна тарувальна формула і в цьому діапазоні дає точне значення (рис. 5) коливань корпусу виробу. Це означає, що якщо навіть фактичні значення лінійних віброприскорень деталей редуктора, які завжди супроводжуються щонайвищими частотами віброударного режиму під час руху, то розраховані в роботі [2] значення лінійних прискорень можуть перевищувати межі вимірювання  $\pm 1,5g$  ( $\pm 14,72 \text{ m/c}^2$ ). У цьому випадку динамічне значення вихідного сигналу МП-95 буде набагато меншим, ніж статичне (дорезонансне), відповідне даній великій амплітуді і все ще знаходитиметься в межах вимірювання його електричного діапазону. При цьому точне значення миттєвого лінійного прискорення корпусу МП-95 буде визначене розрахунковим шляхом за повною динамічною формулою. Це також дає можливість значного розширення зони застосування МП-95 з діапазоном  $\pm 1,5g$  на широкий спектр реальних вібрацій редукторів.

З наведених графіків видно, що необхідність статичного і динамічного тарування всіх давачів МП-95 системи з подальшим записом в базу даних комп'ютера обумовлена ще і тим, що однакові прискорення, що впливають послідовно в різних точках площини вимірювань вимірювальної системи, тільки в тому разі да-

ватимуть однакові значення, що заміряються, якщо градувальна крива кожного окремого вимірювального давача характеризується відомою залежністю, а градувальні криві вимірювальних давачів за однакової чутливості формувача сигналу подібні. Крім того, для деяких типів редукторів верстатів-гойдалок, частота віброударної взаємодії потрапляє в закритичну область власних частот давача даної модифікації. Тому необхідно вивести відповідну диференціальну залежність і провести динамічне тарування кожного давача. Розроблений метод тарування апаратури, відрізняється від існуючих тим, що із застосуванням динамічної тарувальної функції забезпечує точність до 7-9% кожного екземпляра МП-95 в робочому діапазоні частот коливань підйомних судин. Тільки так давачі відповідатимуть вимогам, що пред'являються, і їх буде можливо розглядати як єдину систему. Оскільки за великого діапазону падає чутливість, то щоб компенсувати це падіння чутливості необхідно застосовувати підвищену напругу живлення резистивних давачів (МП-95 допускає напругу до 6,3 В).

### Висновки

1. Якщо віброудари в редукторі незначні, то частота таких вібрацій не перевищує 3-4 Гц. У цьому випадку МП-95 з діапазоном  $\pm 1,5g$  працюватиме в дорезонансному режимі акселерометра, оскільки його власна частота  $\lambda_{вл} = 7 \pm 2$  Гц і це забезпечить необхідну точність.

2. У редукторах, де зіткнення і частота вібрації рівні 7-8 Гц у разі використання формули статичного тарування пропонується МП-95 діапазоном від  $-3,5$  до  $+10g$  з  $\lambda_{вл} = 14 \pm 3$  Гц.

3. Для легких верстатів-гойдалок (менше 3 т), де є значні порушення в роботі і виникають великі вібрації редукторів, доцільно використовувати МП-95 з діапазоном  $\pm 20g$  ( $\lambda_{вл} = 23 \pm 3$  Гц).

4. У всіх перелічених вище випадках МП-95 працюватиме в дорезонансному режимі, і статичне тарування дасть достатню точність порівняно з динамічним.

5. Якщо використовувати МП-95 для порушеної плавності руху ВК, то можна використовувати МП-95 з діапазоном  $\pm 1,5g$ , застосовуючи формулу динамічного тарування. В цьому випадку необхідні диференціювання і згладжування вихідного сигналу виробу у вимірювальній апаратурі, а також вимірювання частоти коливань вихідного сигналу МП-95 і порівняння під час комп'ютерної обробки даних вимірювання з частотою власних пружних коливань повзуна. Результати порівняння враховуються у вигляді зміни знаку в остаточному значенні розрахованого миттєвого прискорення корпусу виробу.

1 Лопатин В.В. Динамика измерительного устройства МП-95 при контроле плавности движения подъемных сосудов шахтных подъемных установок // Вибрации в технике и технологиях. – 1998. – № 3 (7). – С. 84-85.

2 Ильин С.Р., Лопатин В.В. Критерий оценки динамических режимов взаимодействия подъемных сосудов с проводниками жесткой армировки шахтных стволов // Системные технологии: Региональный межвуз. сб. науч. тр. – 2000. – Вып. 9. – С. 43-48.

3 Копей Б.В., Стефанишин О.І., Данилюк М.О. Підвищення якості ремонту редукторів штангових свердловинних насосних установок // Матеріали Міжнародної конференції “Підвищення якості, надійності та довговічності технічних систем і технологічних процесів”, 3-10 грудня 2006 р. – м. Шарм Ель Шейх (Єгипет), 2006. – С.28-33.

4 Копей Б.В., Стефанишин О.І., Копей І.Б. Аналіз надійності редукторів верстатів-гойдалок // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2006. – № 4(21). – С. 96-99.

5 Копей Б.В., Кіндрачук С.М., Копей І.Б. Визначення оптимального міжремонтного періоду свердловинної штангової насосної установки / ІФДТУНГ. – Івано-Франківськ, 1995. – 8 с. – Деп. в ДНТБ України 25.11.95 – №2490 – Ук95.